

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Kurzfassung	V
Abstract	VI
Abbildungsverzeichnis	X
Tabellenverzeichnis	XV
Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes	XVI
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund	1
1.2 Motivation und Forschungsfragen	6
1.3 Zielstellung und Lösungsansatz	8
2 Erzeugungsanlagen mit Vollumrichter: Modell, Fault Ride-Through und Klassifikation	13
2.1 Modell einer Vollumrichteranlage	13
2.1.1 Innere Regelschleife	14
2.1.2 Äußere Regelschleife	15
2.1.3 Synchronisation	16
2.2 Regulatorischer Rahmen für das Fault Ride-Through	17
2.3 Klassifikation hinsichtlich netzdienlicher Eigenschaften	19
3 Grenzen der Wirk- und Blindstromeinspeisung von Vollumrichteranlagen.....	23
3.1 Verlust des synchronen Netzbetriebs von Vollumrichteranlagen	24
3.1.1 Frequenzabfall bei kapazitivem Anlagenverhalten.....	25
3.1.2 Frequenzanstieg bei generatorischem Anlagenverhalten.....	26
3.1.3 Synchroner Netzbetrieb bei angepasstem Kurzschlussstrom	27
3.1.4 Vergleich der Spannungen am Netzanschlusspunkt.....	29
3.1.5 Analyse der Frequenzabweichung	30
3.2 Grenzen der Wirk- und Blindstromeinspeisung einer Vollumrichteranlage im Kurzschlussfall	31
3.2.1 Wirkung einer kapazitiven Blindstromeinspeisung auf die Knotenspannung.....	33
3.2.2 Wirkung einer Wirkstromeinspeisung auf die Knotenspannung.....	36
3.2.3 Mathematische Beschreibung und Auswertung der Grenzen.....	37
3.2.4 Einschränkung der Grenzen der maximal einspeisbaren Ströme	40
3.3 Unangemessene Kurzschlussstromeinspeisung in der iterativen Kurzschlussstromberechnung	41
4 Einführung in die Kurzschlussstromberechnung.....	45
4.1 Kurzschlussstromzeitverlauf und charakteristische Kurzschlussstromkenngrößen..	46
4.2 Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms	49
4.2.1 Überlagerungsverfahren.....	50
4.2.2 Verfahren mit der Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlussstelle	54

5 Mathematische Beschreibung des Kurzschlussstrombeitrags unterschiedlich geregelter Vollumrichteranlagen	59
5.1 Kurzschlussstrombeitrag netzfolgender Vollumrichteranlagen	60
5.2 Kurzschlussstrombeitrag von als Stromquellen implementierten netzstützenden Vollumrichteranlagen	60
5.2.1 Kurzschlussstrom bei stabilem Betriebsverhalten	61
5.2.2 Kurzschlussstrom bei instabilem Betriebsverhalten	63
5.3 Kurzschlussstrombeitrag von als Spannungsquellen implementierten netzstützenden und netzbildenden Vollumrichteranlagen.....	64
5.3.1 Netz mit direkt gekoppelten Synchrongeneratoren.....	65
5.3.2 Inselnetz ohne direkte gekoppelte Synchrongeneratoren	67
6 Einbindung von Vollumrichteranlagen in das Überlagerungsverfahren.....	69
6.1 Anwendung des Überlagerungsprinzips auf den Änderungszustand des Überlagerungsverfahrens.....	69
6.2 Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms	72
6.2.1 Aufbau der Matrizen.....	74
6.2.2 Initialisierung	76
6.2.3 Iterative Berechnung.....	77
6.2.4 Abschließende Berechnungen.....	78
6.2.5 Berechnung der Kurzschlussströme netzbildender Vollumrichteranlagen....	79
6.2.6 Identifikation instabiler Vollumrichteranlagen.....	81
6.2.7 Berechnung der Kurzschlussströme netzstützender Vollumrichteranlagen ..	82
6.3 Mögliche Konvergenzprobleme aufgrund iterativen Springens zwischen zwei Punkten auf der Blindstrom-Spannungsfall-Charakteristik.....	85
7 Fallstudie A: Windpark mit zehn Windenergieanlagen	87
7.1 Betriebspunktunabhängige Berechnung der Anfangs-Kurzschlusswechselströme ..	89
7.2 Betriebspunktabhängige Berechnung der Anfangs-Kurzschlusswechselströme	90
7.2.1 Kurzschlussströme ohne netzbildende Vollumrichteranlagen.....	90
7.2.2 Kurzschlussströme mit netzbildenden VU.....	96
8 Fallstudie B: Windsammelschiene mit 88 Windparks	103
8.1 Netzreduktion.....	104
8.2 Berechnungsergebnisse	105
9 Zusammenfassung	111
10 Ausblick	115
11 Anhang.....	117
11.1 Matrixoperationen	117
11.1.1 Elementweise Matrizenmultiplikation	117
11.1.2 Elementweise Matrizendivision.....	117
11.2 Übertragungsfunktion der spannungsorientierten Vektor-Stromregelung.....	117
11.3 Betriebsmitteldaten und Impedanzen der Simulationsanordnung in Bild 3.1.....	118
11.4 Berechnung der Torimpedanzen des fehlerbehafteten Netzes	120

11.5 Kurzschlussstromkenngrößen	122
11.6 Empirische Analyse notwendiger Vollumrichteranlagen	123
11.7 Betriebsmitteldaten zu Kapitel 7.....	124
11.8 Optimaler Blindstrombeitrag zur Maximierung des Kurzschlussstrombeitrags	125
11.9 Betriebsmitteldaten zu Kapitel 8.....	126
12 Literaturverzeichnis	129